

УДК 631.36

А. Дячун¹, канд. техн. наук; О. Ляшук¹, канд. техн. наук; В. Диня²;
С. Білик², канд. техн. наук

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

²Бережанський агротехнічний інститут національного університету
біоресурсів та природокористування України

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ КРИВОЛІНІЙНИХ КОНТУРІВ ЦИЛІНДРИЧНОЮ ФРЕЗОЮ

Резюме. Наведено математичну модель фрезерування радіусних поверхонь по внутрішньому і зовнішньому контурах кінцевими фрезами. Виведено аналітичні залежності для визначення товщини зрізу металу зубом у процесі обертання й переміщення фрези по еквідистанті до контуру. Уточнено формулу з математичної моделі для визначення сили різання під час фрезерування криволінійних контурів кінцевими фрезами. Результати досліджень представлено у вигляді графіків.

Ключові слова: фрезерування криволінійних контурів, кінцеві фрези, сила різання.

A. Diachun, O. Liashuk, V. Dynia, S. Bilyk

MATHEMATICAL MODEL OF MILLING THE CURVILINEAR CONTOURS BY MEANS OF CYLINDRICAL CUTTER

The summary. The theoretical research of the peculiarities of milling the radius surfaces along the internal and external counters of finger cutters is conducted. The analytical dependences for determining the thickness of metal cut by the tooth during the cutter's rotation and replacement along the equidistant to the counter are developed. The formula from the mathematical model for determining the cutting power during the milling of curvilinear contours by terminal cutters is specified. The results of the research are presented in a form of graphics.

Key words: milling of curvilinear contours, annular cutters, cutting power.

Умовні позначення

r_i – відстань від центра фрези в момент руху першого зуба до траєкторії переміщення другого зуба, мм;
 r – радіус фрези по вершинах зубів, мм;
 R – відстань від центра оброблюваного контуру до миттєвої точки контакту другого зуба, мм;
 β – миттєвий кут переміщення першого зуба відносно центра контуру, град;
 Θ – миттєвий кут переміщення другого зуба фрези вздовж еквідистанти отримуюваного контуру, град;
 R_3 – радіус отримуюваного контуру, мм;
 α – миттєвий кут обертання фрези, град;
 t – глибина фрезерування, мм;
 S_z – величина подачі фрези на зуб, мм;
 α_0 – кут розміщення зубів у фрезі, град;
 z – кількість зубів у фрезі;
 σ_{st} – середнє напруження текучості оброблюваного матеріалу, МПа;
 B – ширина різання, мм;
 μ_1 – коефіцієнт тертя між стружкою і зубом на передній поверхні зуба;
 γ – передній кут зуба, град;
 k_c – коефіцієнт усадки стружки;
 μ_2 – коефіцієнт тертя між обробленою поверхнею заготовки і задньою поверхнею зуба;
 l_3 – довжина контакту зуба із заготовкою, мм.

Постановка проблеми. Однією із передумов подолання кризової ситуації у національній економіці є подальший розвиток машинобудування, який сприяє зростанню продуктивності праці, підвищенню ефективності виробництва, покращенню

якості продукції та вимагає принципово нових підходів до створення й використання високоефективних ресурсощадних технологій.

В умовах швидкозмінних потреб ринку для одиничного і дрібносерійного виробництва характерне використання операції фрезерування контуру на фрезерному верстаті з ЧПК, що відрізняється від операцій штампування в традиційних технологічних процесах середньосерійного типу виробництва. Для фрезерування криволінійного контуру з мінімальними витратами часу потрібна інформація щодо навантажень на систему верстат-пристрій-інструмент-деталь, тобто визначення силових параметрів процесу різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження процесу фрезерування присвячені наукові праці П.И. Ящеріцина, Л.М. Єременко. [1], А.Л. Воронцова, А.Ю. Албагачієва [2] та інших. У працях вказаних авторів проведені дослідження фрезерування прямолінійних контурів циліндричними фрезами, проте, як встановили експериментальні дослідження і розрахункові теоретичні схеми, процес фрезерування радіусних поверхонь має свої особливості.

Метою даної роботи є проведення теоретичних досліджень процесу фрезерування радіусних поверхонь та визначення сили різання, що виникає під час цього процесу при виготовленні елементів приводу механізмів односторонньої дії.

Реалізація роботи. Під час процесу фрезерування радіусних поверхонь криволінійних контурів зубчастих приводів ланцюгових конвеєрів [4] кінцевими циліндричними фрезами товщина різання металу змінюється від нуля під час врізання зуба до h_{imax} під час виходу зуба з контакту із заготовкою. Оскільки траєкторія переміщення зуба відповідає циклоїді, то вказані вище переміщення можна представити у вигляді векторної суми двох переміщень (рис. 1): обертання зуба навколо центра фрези на кут α та переміщення зуба вздовж траєкторії отриманого контуру на кут Θ . При цьому обробка можлива по зовнішньому контуру (рис. 1а) та по внутрішньому контуру (рис. 1б).

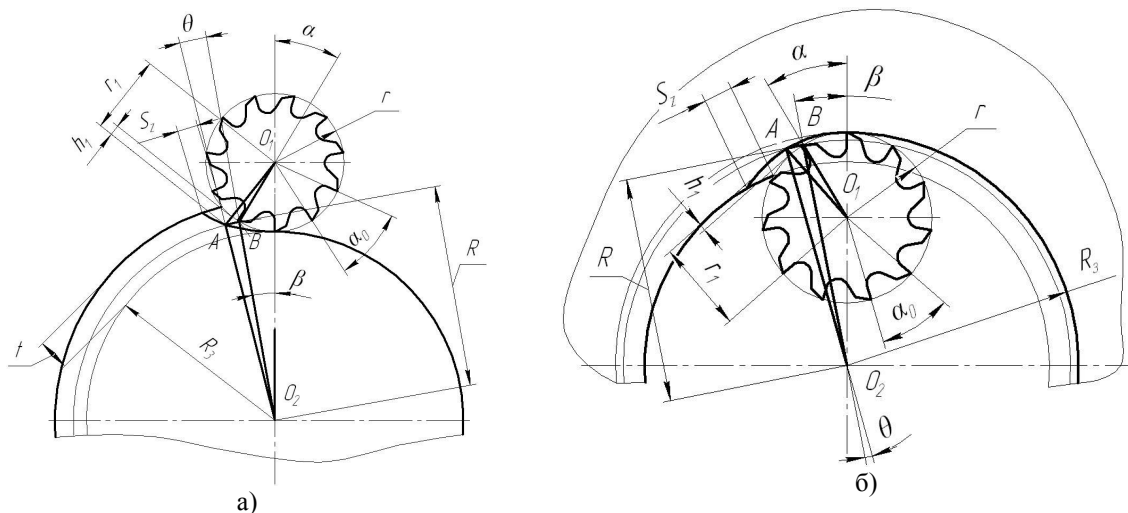


Рисунок 1. Розрахункова схема процесу фрезерування радіусних криволінійних поверхонь кінцевою фрезою:

а) фрезерування зовнішнього контуру; б) фрезерування внутрішнього контуру

Із розрахункової схеми рис. 1 визначаємо товщину зрізу за формулою

$$h_i = r_1 - r. \quad (1)$$

Із трикутника O_1AO_2 знаходимо відстань від центра фрези в момент руху першого зуба до траєкторії переміщення другого зуба:

- під час фрезерування по зовнішньому контуру

$$r_i = \sqrt{R^2 + (R_3 + r)^2 - 2R(R_3 + r) \cdot \cos(\beta + \theta)}; \quad (2)$$

- під час фрезерування по внутрішньому контуру

$$r_i = \sqrt{R^2 + (R_3 - r)^2 - 2R(R_3 - r) \cdot \cos(\beta + \theta)}. \quad (3)$$

Відстань від центра оброблюваного контуру до миттєвої точки контакту другого зуба визначаємо із трикутника O_1BO_2 :

- під час фрезерування по зовнішньому контуру

$$R = \sqrt{(r \cdot \sin \alpha)^2 + (R_3 + r(1 - \cos \alpha))^2}; \quad (4)$$

- під час фрезерування по внутрішньому контуру

$$R = \sqrt{r^2 + (R_3 - r)^2 - 2r(R_3 - r) \sin \alpha}. \quad (5)$$

Миттєвий кут переміщення першого зуба відносно центра контуру знаходимо із трикутника O_1BO_2 :

- під час фрезерування по зовнішньому контуру

$$\beta = \arctg \left(\frac{r \sin \alpha}{(R_3 + r) - r \cos \alpha} \right); \quad (6)$$

- під час фрезерування по внутрішньому контуру

$$\beta = \arctg \left(\frac{r \cos \alpha}{(R_3 - r) - r \sin \alpha} \right). \quad (7)$$

Підставляючи значення формул (4) і (2) у формулу (1), знаходимо товщину зрізу під час фрезерування по зовнішньому контуру кінцевою фрезою:

$$h_i = \sqrt{(r \cdot \sin \alpha)^2 + (R_3 + r(1 - \cos \alpha))^2 + (R_3 + r)^2 - 2\sqrt{(r \cdot \sin \alpha)^2 + (R_3 + r(1 - \cos \alpha))^2} \cdot (R_3 + r) \cos(\beta + \theta)}. \quad (8)$$

Підставляючи значення формул (3) і (5) у формулу (1), знаходимо товщину зрізу під час фрезерування по внутрішньому контуру:

$$h_i = \sqrt{r^2 + (R_3 - r)^2 - 2r(R_3 - r) \sin \alpha + (R_3 - r)^2 - 2\sqrt{r^2 + (R_3 - r)^2 - 2r(R_3 - r) \sin \alpha} \cdot (R_3 - r) \cos(\beta + \theta)}. \quad (9)$$

Товщина зрізу h_i досягає максимуму $h_{i\max}$ під час виходу зуба з контакту із заготовкою, при цьому миттєвий кут обертання фрези знаходимо за формулами:

- під час фрезерування по зовнішньому контуру

$$\alpha = \arccos \left(\frac{r^2 + (R_3 + r)^2 - (R_3 + t)^2}{2r \cdot (R_3 + r)} \right); \quad (10)$$

- під час фрезерування по внутрішньому контуру

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{r^2 + (R_3 - r)^2 - (R_3 - t)^2}{2r \cdot (R_3 - r)} \right). \quad (11)$$

Максимальне значення миттєвого кута переміщення другого зуба кінцевої фрези вздовж еквідистанти отриманого контуру знаходимо в момент виходу зуба з контакту із заготовкою за формулами:

- під час фрезерування по зовнішньому контуру

$$\theta = \frac{180S_z}{\pi(R_3 + t)}; \quad (12)$$

- під час фрезерування по внутрішньому контуру

$$\theta = \frac{180S_z}{\pi(R_3 - t)}. \quad (13)$$

Під час процесу фрезерування заготовки одночасно бере участь кілька зубів кінцевої фрези. Їх кількість визначають за формулою

$$i_z = \frac{\alpha}{\alpha_0}. \quad (14)$$

Кут розміщення зубів у фрезі знаходимо за формулою

$$\alpha_0 = \frac{360}{z}. \quad (15)$$

Підставляючи значення формул (10) і (15) у формулу (14), знаходимо кількість зубів фрези, що одночасно беруть участь у процесі фрезерування:

- під час фрезерування по зовнішньому контуру

$$i = \frac{z \cdot \arccos\left(\frac{r^2 + (R_3 + r)^2 - (R_3 + t)^2}{2r \cdot (R_3 + r)}\right)}{360}; \quad (16)$$

- під час фрезерування по внутрішньому контуру

$$i = \frac{z \cdot \arcsin\left(\frac{r^2 + (R_3 - r)^2 - (R_3 - t)^2}{2r \cdot (R_3 - r)}\right)}{360}. \quad (17)$$

Отримані числа з формул (16) і (17) заокруглюють до найближчого більшого цілого числа i_z .

Сумарну силу різання P_z визначають для товщин зрізу, що відповідають кутам: $\alpha_1 = \alpha$; $\alpha_2 = \alpha_1 - \alpha_0$; $\alpha_i = \alpha_{i-1} - \alpha_0$. При цьому миттєві кути переміщення другого зуба фрези вздовж еквідистанти отриманого контуру знаходимо із виразів $\Theta_1 = \Theta$; $\Theta_2 = \Theta_1 - \Theta_0$; $\Theta_i = \Theta_{i-1} - \Theta_0$, де Θ_0 – різниця між кутами переміщення зубів фрези вздовж еквідистанти отриманого контуру, яку знаходимо за формулами:

- під час фрезерування по зовнішньому контуру

$$\theta_0 = \frac{180S_z}{\pi \cdot i_z (R_3 + t)}; \quad (18)$$

- під час фрезерування по внутрішньому контуру

$$\theta_0 = \frac{180S_z}{\pi \cdot i_z (R_3 - t)}. \quad (19)$$

На основі вищенаведених формул, враховуючи дослідження, представлені в літературі [2], силу різання під час фрезерування циліндричною кінцевою фрезою

можна визначати за формулою

$$P_z = 1,155 \cdot \sigma_{st} \cdot B \cdot \left[\left(1 + \mu_1 (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{0,5 + \mu_1}{2k_c} \right) \cos \gamma + \frac{k_c}{4 \cos \gamma} + \mu_1 \sin \gamma + \mu_2 \frac{l_3}{\sum_{i=1}^{i_z} h_i} \right] \cdot \sum_{i=1}^{i_z} h_i \quad (20)$$

На основі значень формул (8) і (20) побудовані графічні залежності (рис. 2, 3, 4 та рис. 5) товщини зрізу і сили різання від параметрів процесу фрезерування.

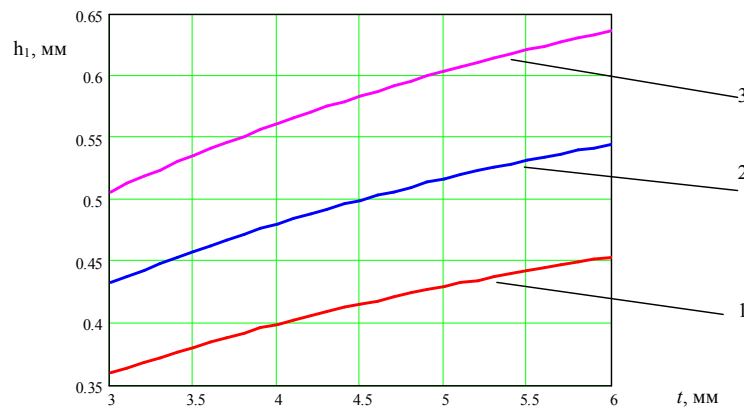


Рисунок 2. Графік залежності товщини зрізу від глибини фрезерування ($R_3=60\text{мм}$, $r=12\text{мм}$)
1 – $S_z=0,5\text{мм/зуб}$; 2 – $S_z=0,6\text{мм/зуб}$; 3 – $S_z=0,7\text{мм/зуб}$

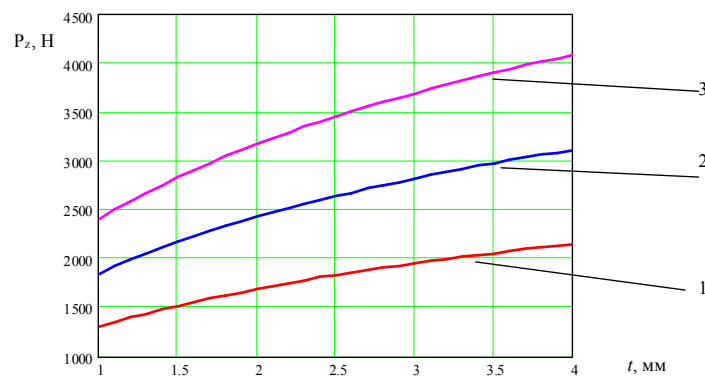


Рисунок 3. Графік залежності сили різання від глибини фрезерування (матеріал заготовки сталь 45, $R_3=60\text{мм}$, $r=12\text{мм}$, $B=5\text{мм}$) 1 – $S_z=0,2\text{мм/зуб}$; 2 – $S_z=0,3\text{мм/зуб}$; 3 – $S_z=0,4\text{мм/зуб}$

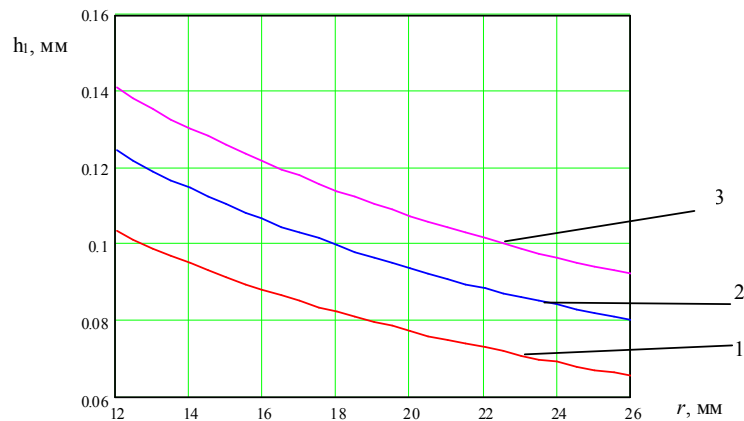


Рисунок 4. Графік залежності товщини зрізу від радіуса фрези ($R_3=60$ мм, $S_z=0,2$ мм/зуб)
1 – $t=2$ мм; 2 – $t=3$ мм; 3 – $t=4$ мм

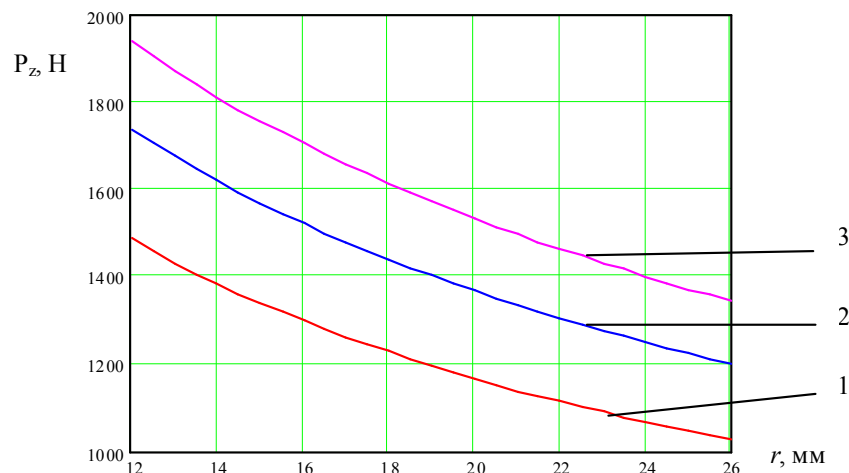


Рисунок 5. Графік залежності сили різання від радіуса фрези (матеріал заготовки сталь 45, $R_3=60$ мм, $S_z=0,2$ мм/зуб, $B=5$ мм) 1 – $t=2$ мм; 2 – $t=3$ мм; 3 – $t=4$ мм

Із графіків на рисунках 3 – 5 робимо висновки, що підвищення подачі фрези на зуб та глибини фрезерування призводить до зростання товщини зрізу матеріалу і сили різання, а використання фрези більшого радіуса призводить до зменшення товщини зрізу матеріалу і сили різання.

Висновки. Розроблено математичну модель процесу фрезерування криволінійних контурів приводних зірочок гнучких ланцюгових конвейєрів кінцевими фрезами. На основі результатів теоретичних досліджень виведено рівняння для визначення сил фрезерування та товщини зрізу металу. Побудовано відповідні графічні залежності сил різання криволінійних контурів кінцевими фрезами.

Література

1. Ящерицын, П.И. Основы резания материалов и режущий инструмент [Текст] / П.И. Ящерицын, Л.М. Еременко, Н.И. Жигалко. – Мн.: Выш. школа, 1981. – 560 с.
2. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания. Расчет параметров цилиндрического фрезерования [Текст] / А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев // Весник машиностроения. – 2008. – № 10. – С. 73–79.
3. Косилова, А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. [Текст] / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 1985. – 495 с.

4. Пат. № 52568 Україна, МПК В 65 G 33/00. Гнучкий ланцюговий конвеєр / Гевко Б. М., Ляшук О.Л., Стефанів В.М. та інші; заявник і патентовласник Тернопільський національний технічний університет. – № 2u201004000 ; заявл. 06.04.10 ; опубл. 25.08.10, Бюл. № 16.

Отримано 28.10.2011